

基于误差函数的复材加筋板概率成像冲击定位*

杨雷, 邓德双, 田广, 高宗波, 包笑飞, 武湛君

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 大连, 116024)

摘要 提出了一种复合材料加筋板结构概率成像冲击定位方法。通过在复合材料加筋板结构表面布置稀疏阵列的压电传感器网络接收冲击响应信号,采用复Morlet小波变换提取冲击响应信号特定中心频率的窄带Lamb波信号并计算模值,根据模的峰值获取Lamb波的到达时刻,构建基于波达时间差的误差函数并计算监测区域内各点为冲击源的概率值,将概率值作为像素值对结构进行概率成像冲击定位。在总体尺寸为700 mm×450 mm的碳纤维增强复合材料加筋板结构上对算法进行了验证。实验结果表明,该算法简单有效,成像分辨率和定位精度高,采用较少的传感器数量依然拥有可观的冲击定位精度。

关键词 压电传感器;小波变换;误差函数;复合材料加筋板;概率成像冲击定位

中图分类号 TH145.9;TB332

引言

碳纤维复合材料由于其比强度、比刚度优于传统金属材料,且具有优异的抗疲劳性能,在飞行器结构得到广泛应用^[1]。飞行器在服役期间不可避免地会受到外来物的冲击,低速冲击造成复合材料结构内部不可见的损伤,严重威胁结构的健康安全^[2]。目前,主要还是通过定期的无损检测来发现低速冲击对复合材料结构造成的损伤。无损检测包括目视检查和超声波扫查。目视检查效果易受环境和检查人员素质的影响;超声扫查则存在检测效率偏低、设备成本高昂等缺点^[3]。因此,在服役环境下对冲击事件进行实时在线监测,是解决上述困境的有效途径^[4]。

对复合材料结构进行实时在线的冲击监测需要可靠的冲击定位方法。例如,袁慎芳等^[5]提出了基于多重信号分类的冲击定位方法,在复合材料平板及飞机油箱实验中定位精度较高。邱雷等^[6]通过小波变换提取应力波相速度,利用基于相位合成的时间反转聚焦技术在加筋复合材料板上进行冲击定位成像。Migot等^[7]利用双曲线原理结合高斯分布函数对复合材料平板进行冲击概率成像定位。Zargar等^[8]通过对加强铝板冲击过程进行数值模拟,建立机器学习模型对数值模拟得到的波场进行训练,实

现了有限元模型上冲击载荷的位置识别。

尽管对复合材料结构冲击定位的研究已经取得很大的进展,但仍有不足。例如:双曲线原理需要获取结构的波速分布^[9],时间反转算法通过叠加Lamb波的幅值来聚焦成像,对于加筋复合材料板结构,由于能量耗散现象直达波的幅值较小,反射波的幅值会对成像的分辨率造成较大影响^[10]。基于密集线性阵列的多重信号分类算法需要采用较多的传感器^[11],基于机器学习的冲击定位方法需要提供大量的训练数据,在实际应用中存在困难^[12]。

笔者提出了一种基于波达时间差(time difference of arrival,简称TDOA)构建误差函数的复合材料加筋板结构概率成像冲击定位方法。该方法无需测量波速,也无需结构的先验知识,只需要传感器的位置坐标和波达时间差就能对结构实现冲击成像定位,在准各向同性的复合材料加筋板上进行冲击定位实验,验证了该方法的有效性和可行性。

1 冲击定位原理与方法

图1为笔者提出的冲击定位算法示意图。在尺寸为 $L \times W$ 的复合材料薄壁结构表面监测区域内稀疏布置 n 个压电传感器,编号为 P_i 的传感器的位置坐标记为 (S_{xi}, S_{yi}) , $i=1, 2, \dots, n$ 。对于准各向同

* 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3402500, 2018YFA0702800)

收稿日期:2022-04-13;修回日期:2022-05-16

性复合材料,假定其各个方向的波速相同。若在冲击源 C 发生冲击事件,则根据冲击源 C 到传感器间的距离差、传感器间的波达时间差和波速的关系,得到对于传感器 $P_i, P_j, P_k, P_l (i, j=1, 2, \dots, n)$ 的以下方程

$$D_{ij} = C_g \Delta T_{ij} \quad (1)$$

$$D_{kl} = C_g \Delta T_{kl} \quad (2)$$

其中: D_{ij} 和 D_{kl} 分别为冲击源到传感器 P_i 和 P_j, P_k 和 P_l 的距离差; ΔT_{ij} 和 ΔT_{kl} 分别为传感器 P_i 和 P_j, P_k 和 P_l 的波达时间差; C_g 为波速。

利用式(1)和式(2)消去波速,得到

$$D_{ij} \Delta T_{kl} - D_{kl} \Delta T_{ij} = 0 \quad (3)$$

假定监测区域内某点 (x, y) 为冲击源 C 的位置坐标,构建基于波达时间差的误差函数为

$$E(x, y) = \sum_{i,j,k,l=1}^n |D_{ij} \Delta T_{kl} - D_{kl} \Delta T_{ij}| \quad (4)$$

考虑在薄壁结构当中冲击应力波信号为宽带的 Lamb 波信号,具有频散性。利用复 Morlet 小波变换提取冲击应力波信号的窄带 Lamb 波信号,降低信号的频散性^[13],根据窄带 Lamb 波信号的模信号提取较为准确的波达时间差。将监测区域划分为均匀的网格,提取波达时间差后再计算所有网格点到传感器间的距离差,获得所有网格点的误差函数值。确定某点 (x, y) 为冲击源 C 的概率公式为

$$P(x, y) = \frac{\min(E_{all})}{E(x, y)} \times 100\% \quad (5)$$

其中: $\min(E_{all})$ 为监测区域内所有网格点的最小误差函数值。

以监测区域内每个网格点的概率值作为像素值对结构进行成像,像素值最大的位置即为预测的冲击源位置。

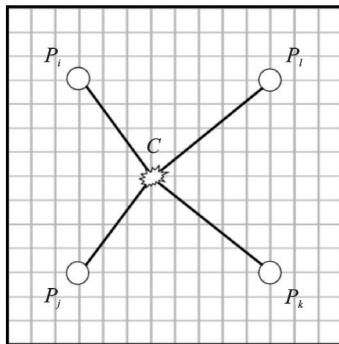


图 1 冲击定位算法示意图

Fig.1 Schematic diagram of impact localization algorithm

2 实验验证

2.1 实验设置

为验证笔者提出的冲击定位方法的可行性和有效性,在如图 2 所示的复合材料加筋板实验件及压电传感器网络上进行落锤冲击实验。加筋板总体尺寸为 700 mm×450 mm,材料为 T700/BA9916 复合材料,蒙皮厚度为 1 mm,铺层方式为准各向同性的 [45/90/-45/0/0/-45/90/45]。蒙皮表面粘贴有 4 条 T 型加筋,筋条跨距为 130 mm,厚度为 2 mm,铺层方式为 [45/0/-45/90/0/45/-45/0/0/-45/45/0/90/-45/0/45]。实验所用的压电传感器为无锡惠丰电子公司生产的 P-51 型压电陶瓷圆片,直径为 8 mm,厚度为 0.25 mm。在加筋板表面布设 12 个稀疏阵列的压电传感器网络,记作 $P_1 \sim P_{12}$,传感器的横向间距为 160 mm,纵向间距为 130 mm。实验件两端固定,采用如图 3 所示的落锤冲击实验装置对实验件进行冲击实验。

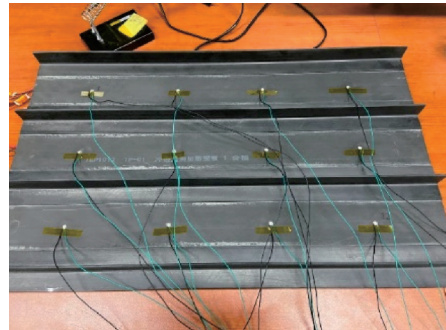


图 2 复合材料加筋板实验件及压电传感器网络
Fig.2 Composite stiffened plate and the sensor network

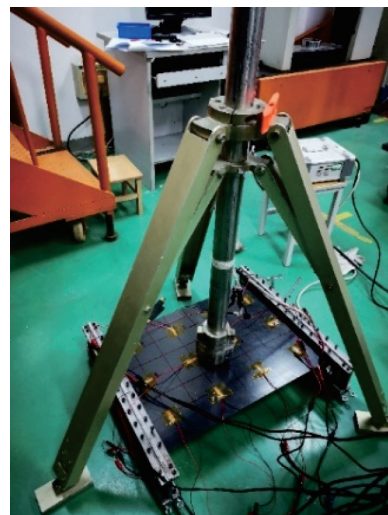


图 3 落锤冲击实验装置
Fig.3 Drop hammer impact test device

2.2 波达时刻获取

取实验件的左下角点为坐标原点,在坐标为(355 mm, 245 mm)的位置进行冲击,波达时刻(time of arrival,简称 TOA)获取如图4所示。采集得到压电传感器 P_1 的冲击响应时域信号如图4(a)所示,信号的采样频率为200 kHz。图4(b)为信号的冲击响应时频谱。可见,冲击响应信号的能量主要集中在0~30 kHz范围内,30 kHz~50 kHz的信号能量非常小。对于连续小波而言,频率越高的信号,其时间分辨率越高。对于Lamb波信号的模式而言,频率越高的信号,信号模式越复杂。一般在100 kHz以下,Lamb波主要存在 A_0 和 S_0 两种模式,且 A_0 模式占主导地位^[14]。综合考虑,利用复Morlet连续小波变换从冲击响应信号中提取中心频率为20 kHz

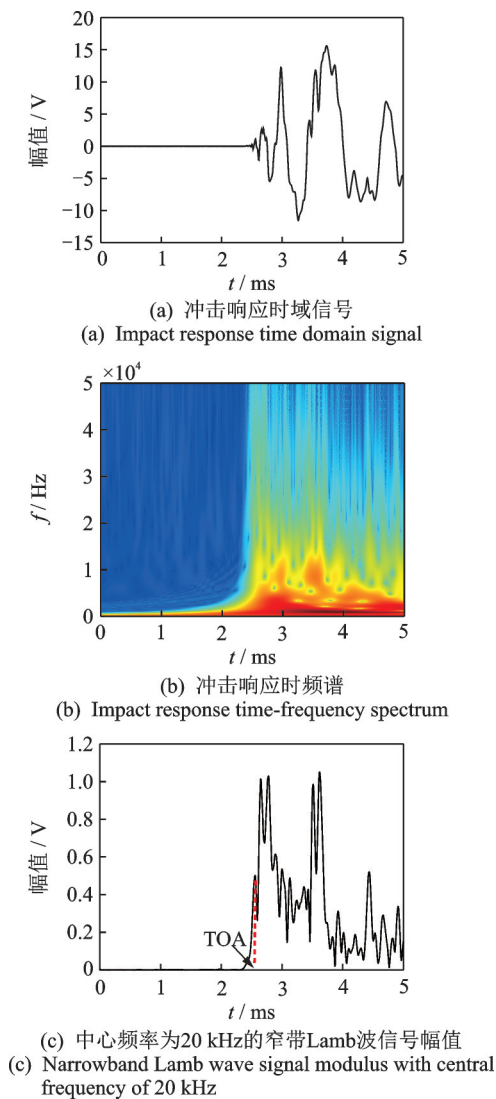


图4 波达时刻获取

Fig.4 Determination of time of arrival

的窄带Lamb波信号,如图4(c)所示,根据窄带Lamb波模信号的峰值测量 A_0 模态Lamb波的波达时刻。

2.3 筋条对波传播的影响

顾欣等^[15]通过实验对加筋板上不同位置的冲击响应信号进行分析,实验表明加强筋会吸收更多冲击能量,对冲击波的幅值具有较大衰减作用。笔者采用有限元方法模拟导波的传播过程,对导波与筋条之间的相互作用做进一步研究。利用有限元软件分别建立平板和加筋板的仿真模型,在蒙皮左侧某点的上下表面施加相同的面外位移,以激发单一的 A_0 模态Lamb波,将蒙皮右侧一点的面内位移设置为接收信号。激励信号为汉宁窗调制的5周期正弦波信号,中心频率取20 kHz,与实验验证中使用的频率一致。采样频率为10 MHz,足以捕捉激励频率下的信号波形。

筋条对 A_0 模态Lamb波传播的影响如图5所示。可以看到,波传播过筋后与不过筋相比幅值发生较大衰减,这与文献实验结果一致。此外,波过筋后相位发生了延迟,这会对波达时间的准确提取产生一定影响。

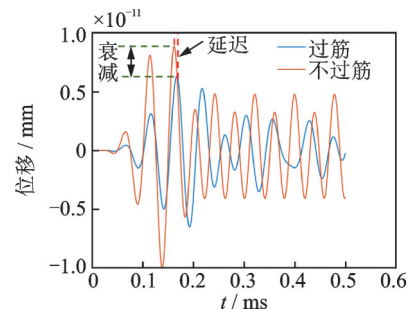
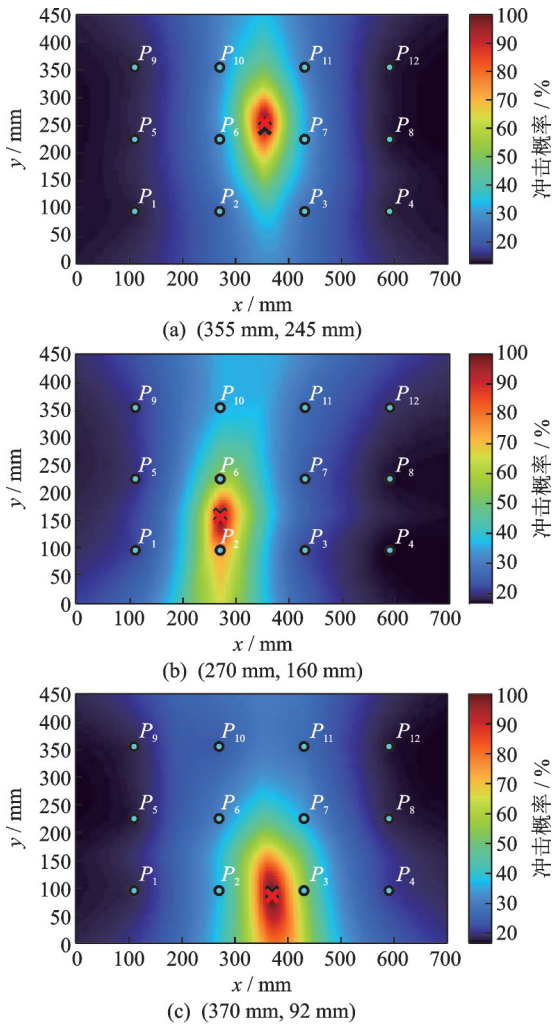


图5 筋条对 A_0 模态Lamb波传播的影响

Fig.5 The influence of stiffener on wave propagation of A_0 mode Lamb wave

2.4 结果与讨论

根据笔者提出的基于误差函数的概率成像冲击定位算法,选取3个冲击位置分别为(355 mm, 245 mm), (270 mm, 160 mm)和(370 mm, 92 mm)的冲击事件进行概率成像定位。图6为基于误差函数的冲击定位结果。可以看到,不管是在监测区域的中心位置,还是在靠近边界的位置,基于误差函数的概率成像冲击定位算法均能准确地预测冲击位置,且成像分辨率较高。



黑色的×表示实际冲击位置;红色的×为预测的冲击位置
图 6 基于误差函数的冲击定位结果

Fig.6 Impact localization results based on error function

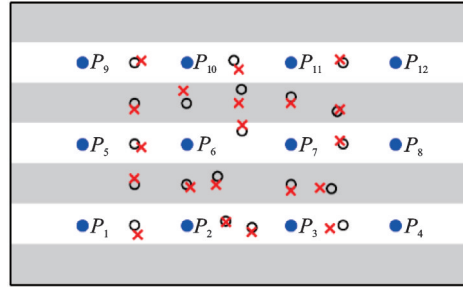
为了进一步评估算法的定位精度,定义冲击定位误差为

$$e = \sqrt{(x_p - x_r)^2 + (y_p - y_r)^2} \quad (6)$$

其中: x_p 和 y_p 分别为预测冲击位置的横坐标和纵坐标; x_r 和 y_r 分别为真实冲击位置的横坐标和纵坐标。

为了研究加筋板面板上的冲击定位误差分布规律,选取在不同位置的 20 次冲击事件,冲击定位误差分布如图 7 所示。总体来说,当冲击靠近传感器阵列的边界时误差较大,在阵列内部时误差一般较小。这是由于边界会对靠近边界的冲击事件的波达时间的提取造成一定的干扰,但本研究算法的优势在于通过利用所有传感器的信号,提高了算法的容错率,即使有少量传感器的波达时间提取不够精确,依然能够较好地进行定位。另外,非加筋区域冲击事件的平均定位误差比加筋区域的更小。这主要是由于传感器位于非加筋区域,加强筋对于波达时间的提取存在影响,当冲击位于加筋区域时,所有的传

感器路径都要过筋,而当冲击位于非加筋区域,存在 4 条传感器路径不过筋,所以加筋区域的定位误差比非加筋区域稍大。



灰色部分为加筋区域;黑色的0表示实际冲击位置;红色的×表示预测的冲击位置

图 7 冲击定位误差分布图

Fig.7 Diagram of impact localization error distribution

随机抽取 10 次冲击事件的冲击定位误差,笔者所提算法的冲击事件预测冲击位置与实际冲击位置比较如表 1 所示。可以看到,基于笔者提出定位算法,基本上所有冲击事件的定位误差均不超过 2 cm,10 次冲击事件的平均定位误差仅为 1.1 cm。

表 1 预测冲击位置与实际冲击位置比较(误差函数)

Tab.1 Comparison between predicted impact position and actual impact position (error function) mm

序号	实际冲击位置	预测冲击位置	误差
1	(317, 173)	(315, 160)	13.2
2	(270, 160)	(276, 156)	7.2
3	(342, 358)	(350, 344)	16.1
4	(492, 154)	(475, 155)	17.0
5	(330, 102)	(330, 100)	2.0
6	(354, 312)	(350, 290)	22.4
7	(501, 277)	(505, 280)	5.0
8	(355, 245)	(355, 255)	10.0
9	(430, 300)	(430, 290)	10.0
10	(370, 92)	(370, 85)	7.0

在传感器数量与位置相同的条件下,同时采用参考文献[15]的双曲线概率成像算法进行冲击定位,其预测冲击位置与实际冲击位置比较如表 2 所示。可以看到,双曲线概率成像定位算法的最大误差超过 4 cm,平均定位误差为 1.9 cm,均大于笔者所提出算法。因此,笔者所提出算法在定位精度方面更具有优势。

在实际情况中由于一些不可预测的因素,参与定位的有效传感器数量会减少。因此,有必要研究减少传感器数量情况下算法的性能。减少 1/3 的传感器数量后,根据笔者提出算法得到上述 3 个冲击位置的冲击定位结果如图 8 所示。可以看到,减少

表2 预测冲击位置与实际冲击位置比较(双曲线原理)

Tab.2 Comparison between predicted impact position and actual impact position(hyperbolic principle) mm

序号	实际冲击位置	预测冲击位置	误差
1	(317, 173)	(338, 174)	21.0
2	(270, 160)	(276, 156)	25.3
3	(342, 358)	(346, 346)	12.6
4	(492, 154)	(502, 114)	41.2
5	(330, 102)	(334, 102)	4.0
6	(354, 312)	(358, 286)	26.3
7	(501, 277)	(514, 288)	17.0
8	(355, 245)	(356, 258)	13.0
9	(430, 300)	(446, 314)	21.3
10	(370, 92)	(368, 82)	10.2

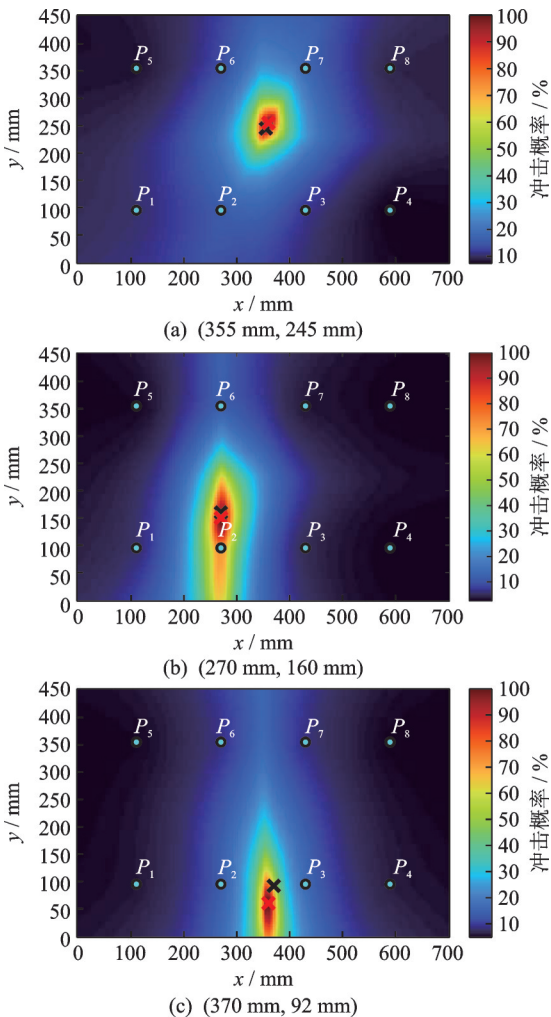


图8 减少传感器数量后的冲击定位结果

Fig.8 Impact localization after reducing the number of sensors

传感器数量后,笔者所提出算法的总体冲击定位精度有所降低,但对监测区域内部的冲击事件仍具有较高的定位精度,只是对靠近边界位置的冲击事件的定位精度下降比较明显。

减少传感器数量前后冲击定位误差对比如图9所示。总的来说,传感器数量减少后,笔者提出的冲击定位算法的定位误差有所增加,但依然拥有较好的精度和成像分辨率,对大部分冲击事件的定位误差不超过3 cm,平均定位误差为2.5 cm,这对于实际工程应用是非常有益的。

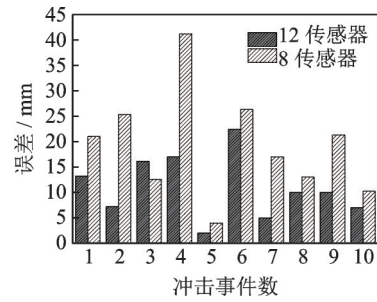


图9 减少传感器数量前后冲击定位误差对比

Fig.9 Comparison of impact localization error before and after reducing the number of sensors

3 结论

1) 笔者提出的一种基于误差函数的概率成像冲击定位方法适用于各向异性不强的复合材料加筋板结构,无需测量结构的波速分布,也无需结构的先验知识,实施过程简单,有助于复合材料结构冲击监测技术的工程应用。

2) 在总体尺寸为700 mm×450 mm的复合材料加筋板结构上验证了笔者所提出算法的有效性,对10次冲击事件的平均定位误差仅为1.1 cm。

3) 减少参与冲击定位的传感器数量会增大所提出算法的冲击定位误差,但仍然拥有可观的定位精度。

4) 筋条对波的传播有延迟作用,这会对波达时间的准确提取带来一定影响,在后续研究中需考虑如何对筋条造成的相位延迟进行补偿。

参 考 文 献

[1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12. (in Chinese)

[2] SIKDAR S, KUDELA P, RADZIENSKI M, et al. Online detection of barely visible low-speed impact damage in 3D-core sandwich composite structure [J]. Composite Structures, 2018, 185: 646-655.

- [3] DIAMANTI K, SOUTIS C. Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures [J]. *Progress in Aerospace Ence*, 2010, 46(8): 342-352.
- [4] YUAN S, REN Y, QIU L, et al. A multi-response-based wireless impact monitoring network for aircraft composite structures [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(12): 7712-7722.
- [5] YUAN S F, ZHONG Y, QIU L, et al. Two-dimensional near-field multiple signal classification algorithm-based impact localization [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 26(4): 400-413.
- [6] QIU L, YUAN S, ZHANG X, et al. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(10): 105014.
- [7] MIGOT A, BHUIYAN M Y, GIURGIUTIU V. Impact localization on composite plates using two developed imaging methods [C] // *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*. California, United States: International Society for Optics and Photonics, 2020: 189-200.
- [8] ZARGAR S, YUAN F G. Impact diagnosis in stiffened structural panels using a deep learning approach [J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(2): 681-691.
- [9] ZHU K, QING X P, LIU B. A two-step impact localization method for composite structures with a parameterized laminate model [J]. *Composite Structures*, 2018, 192: 500-506.
- [10] 郑跃滨, 武湛君, 雷振坤, 等. 基于超声导波的航空航天结构损伤诊断成像技术研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2020, 63(18): 24-43.
ZHENG Yuebin, WU Zhanjun, LEI Zhenkun, et al. Research progress in damage diagnostic imaging of aerospace structures based on ultrasonic guided waves [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(18): 24-43. (in Chinese)
- [11] 苏永振, 袁慎芳, 王瑜. 基于多重信号分类算法的复合材料冲击定位 [J]. *复合材料学报*, 2010, 27(3): 105-110.
SU Yongzhen, YUAN Shenfang, WANG Yu. Impact localization in composite using multiple signal classification method [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(3): 105-110. (in Chinese)
- [12] AI L, SOLTANGHARAEI V, BAYAT M, et al. Detection of impact on aircraft composite structure using machine learning techniques [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(8): 084013.
- [13] YAN G. A Bayesian approach for damage localization in plate-like structures using Lamb waves [J]. *Smart Materials & Structures*, 2013, 22(3): 035012.
- [14] 胡宁, 刘瑶璐, 赵友选, 等. 基于低频动态信息和超声导波的复杂结构损伤的在线诊断技术 [J]. *固体力学学报*, 2017, 38(4): 312-347.
HU Ning, LIU Yaolu, ZHAO Youxuan, et al. On-line monitoring technologies for complex structural damage identification based on low-frequency structural dynamic signals and ultrasonic guided waves [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2017, 38(4): 312-347. (in Chinese)
- [15] 顾欣, 曾捷, 钟照振, 等. 复合材料加筋板筋条撞击分布式光纤监测方法 [J]. *强度与环境*, 2020, 47(1): 49-54.
GU Xin, ZENG Jie, ZHONG Zhaozhen, et al. Distributed fiber optic monitoring method for the impact of composite stiffened plates [J]. *Strength and Environment*, 2020, 47(1): 49-54. (in Chinese)



第一作者简介:杨雷,男,1985年7月生,博士、副教授。主要研究方向为复合材料力学、结构健康监测。曾发表《Microscopic failure mechanisms of fiber-reinforced polymer composites under transverse tension and compression》(《Composites Science and Technology》2012, Vol.72, No.15)等论文。

E-mail: yangl@dlut.edu.cn